第 37 卷第 20 期
2017 年 10 月
生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.37,No.20
Oct.,2017

DOI: 10.5846/stxb201607281547
韩路,王海珍,牛建龙,王家强,柳维扬.荒漠河岸林胡杨群落特征对地下水位梯度的响应.生态学报,2017,37(20):6836-6846.
Han L, Wang H Z, Niu J L, Wang J Q, Liu W Y.Response of *Populus euphratica* communities in a desert riparian forest to the groundwater level gradient in the Tarim Basin.Acta Ecologica Sinica,2017,37(20):6836-6846.

荒漠河岸林胡杨群落特征对地下水位梯度的响应

韩 路*,王海珍,牛建龙,王家强,柳维扬
塔里木大学植物科学学院,新疆生产建设兵团塔里木盆地生物资源保护利用重点实验室, 阿拉尔 843300

摘要:依据塔里木荒漠河岸林胡杨群落的实地调查资料与地下水位监测数据,应用多元统计法、Hill 与 β 多样性指数测度法,研究优势种胡杨种群数量特征沿地下水位梯度的变化规律及其相互关系,探讨群落物种多样性对地下水位梯度的生态响应。结果表明,运用系统聚类法将荒漠河岸林不同地下水位的胡杨群落划归为 3 类,优势种群胸径、冠幅、盖度、密度、死亡率与地下水位呈极显著相关(P<0.01)。随地下水位降低,优势种长势减弱,枯死率显著增大,种群退化。Hill 多样性随地下水位梯度呈现 3 个明显不同的变化阶段,其中地下水位 4—6 m 时,多样性指数锐减与曲线渐趋平直,物种多样性开始受损。Cody(β_c)、Whittaker(β_w)指数均随地下水位梯度增大而增大,Sorensen(β_s)指数则呈下降趋势;β_s、β_c、β_w与地下水位高差间均呈极显著相关(P<0.01),地下水位> 4 m,β_c、β_w值显著增大而β_s值显著降低。综合以上分析,地下水位<4 m 胡杨群落结构相似与共有种较多,优势种长势良好,其是优势种群生存的适宜生态水位;地下水位>4 m,群落物种多样性与伴生种减少,物种变化速率增大,生境异质性增强,优势种群数量特征变化明显,群落结构简化;地下水位 6 m 左右,植被退化,物种多样性锐减,优势种稀疏衰败。因此,塔里木荒漠河岸林植被恢复的合理生态地下水位应维持在 4 m 左右。

关键词:荒漠河岸林;胡杨群落;Hill 多样性;β 多样性;地下水位梯度

Response of *Populus euphratica* communities in a desert riparian forest to the groundwater level gradient in the Tarim Basin

HAN Lu*, WANG Haizhen, NIU Jianlong, WANG Jiaqiang, LIU Weiyang
College of Plant Science, Tarim University, Key Laboratory of Protection and Utilization of Biological Resource in Tarim Basin, Xinjiang Production & Construction Groups, Alar 843300, *China*

Abstract: The largest area of desert riparian forest is distributed in the Tarim Basin, northwest China. It controls the structure and function of the desert ecosystem; determines landscape patterns, vegetation processes, and land desertification; and changes the ecological environment of oases in southern Xinjiang. *Populus euphratica* Oliv. is the dominant species and is distributed widely across desert riparian forests. It protects biodiversity and desert ecosystem stability, and serves as a natural barrier to curb desertification and sandstorms. Since the 1950s, land has been reclaimed and the water resources have been utilized in the area. This has resulted in a reduction in the groundwater level, weak vegetation growth, and high desert plant mortality, which has affected the sustainable development of agriculture and the economies of the affected oases. The aim of this study was to understand the ecological responses of *P. euphratica* communities to changes in groundwater levels (GWL), to determine the rational GWL needed for the survival of desert riparian forest, and to provide a theoretical basis for population conservation and vegetation restoration in the Tarim Basin. Nine belt transects and 45 plots were established to monitor the GWL and vegetation in the upper reaches of the Tarim River and the ecological responses of the *P. euphratica* community to the GWL. The relationship between the vegetation and the

基金项目:新疆生产建设兵团应用基础研究(2015AG006);国家自然科学基金项目(31560182,31060066)
收稿日期:2016-07-28; **网络出版日期**:2017-06-01
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: hlzky@ 163.com

GWL gradient were analyzed using multi-analysis methods, and Hill and β-diversity index analyses. The Ward cluster analysis divided the 45 sampling plots into three types and the quantitative characteristics (density, DBH, canopy diameter, coverage, mortality) of the *P. euphratica* population and the GWL gradients were significantly correlated ($P < 0.01$). The *P. euphratica* growth vigor decreased and the population structure transitioned from expanding to declining as the GWL decreased. Species diversity varied considerably in the three different plot types as the GWL decreased. In particular, when the GWL ranged from 4 to 6 m, the Hill-diversity index decreased sharply, and the diversity curve became a smooth line. Species diversity began to decline at GWL > 4 m. Furthermore, the Cody (β_c) and Whittaker (β_w) values increased and the Sorensen (β_s) value decreased as the GWL fell. The β_s, β_c, and β_w indexes, and the differences in groundwater levels were significantly correlated ($P < 0.01$). At GWL > 4 m, the β_c and β_w values increased, but the β_s value decreased considerably. The above analyses suggested that the *P. euphratica* communities had similar structures and many common species, and that the *P. euphratica* population grew most efficiently at GWL < 4 m, which was the most suitable ecological water table for *P. euphratica* population survival. At GWL > 4 m, species diversity and the common species in the community decreased rapidly, differences in species components and environmental heterogeneity increased, the quantitative characteristics of the *P. euphratica* population varied significantly, and the community structure became simplified. When the GWL was about 6 m, vegetation became degraded and the dominant population declined considerably. Therefore, the rational ecological GWL for restoring degraded desert vegetation is about 4 m in extremely arid areas.

Key Words: desert riparian forest; *Populus euphratica* community; Hill diversity; β-diversity; groundwater gradient

中国西部干旱区气候干旱、降水稀少、植被稀疏,生态环境极其脆弱,水资源开发过程中生态与经济的矛盾十分突出。水作为干旱区最关键的生态环境因子,不仅是干旱区绿洲生态系统发展和稳定的基础,而且决定着干旱区绿洲化过程与荒漠化过程这两类极具对立与冲突性的生态环境演化过程[1]。众多研究表明,地表水日益减少甚至断流的干旱区内陆河流域,地下水是维系荒漠植被生长发育与生存的唯一水源[1-5]。地下水位时空变化直接影响着自然植被生长和衰败,控制着植物群落结构与功能动态[1-3],影响干旱区荒漠植被生态服务功能的提升。因此,干旱区地下水位成为制约荒漠植被恢复与绿洲稳定的首要关键因素。然而,干旱区地下水位变化与植被之间具有复杂的关系,它涉及到地下水、土壤和植被等相互之间的动态平衡[1]。为此,许多学者开展了针对地下水与天然植被的关系研究,提出了地下水生态平衡埋深、生态地下水位和合理地下水位、生态水位线以及适宜水位、胁迫水位和生态警戒水位等概念[2,5-8],这些研究为进一步认识荒漠植被和土壤水分、地下水埋深的关系及合理生态水位的确定奠定了基础。

塔里木盆地地处欧亚大陆腹地，它以鲜明地域特色和环境问题著称于世。沿塔里木河两岸分布并经长期自然演替形成的独特荒漠河岸林,成为防风固沙、遏制荒漠化、维护区域经济发展与生态安全、保护生物多样性和保障绿洲农牧业生产的天然屏障。但近 50 a 来,塔里木河流域大规模的水土资源开发致使河流断流、地下水位持续降低;原有荒漠植被的生态过程与自然景观格局被改变,植被退化、沙尘暴剧增、生物多样性锐减[3]、耕地撩荒,严重危及荒漠绿洲生态服务功能与区域社会经济的持续发展。塔里木荒漠河岸林沿环境梯度的生态响应是荒漠河岸林植被恢复与生态需水机理研究中的重要方向,是确定荒漠河岸林合理生态水位和推演适宜生态需水量的基础。诸多学者从不同角度分析了塔里木河水资源开发利用与生态关系,研究内容主要涉及塔里木河中、下游植被与地下水埋深动态关系、植被生理生态响应机理、地下水化学性质与合理生态地下水位等方面[1-6,9],但不同学者的研究结果存在差异且针对塔里木河上游植被格局、优势种群特征沿环境梯度的变化及与地下水埋深的相互关系研究十分有限。因此,研究塔里木荒漠河岸林物种多样性与胡杨种群特征对地下水位梯度的响应是实施流域科学生态输水工程的前提。本文结合近 5 年对塔里木河上游各断面植被样地调查和土壤水分、地下水位的监测资料,探讨胡杨群落生态特征沿地下水位梯度的响应与浅层地下水位变化对胡杨种群的影响,揭示极端干旱区天然植被与地下水位的关系及荒漠河岸林植被的合理生态水位与

生态阈值,为塔里木河流域荒漠植被恢复、生物多样性保护和生态输水提供理论依据。

1 研究区自然概况

塔里木河上游指从阿克苏河、叶尔羌河、和田河三河交汇的肖夹克至轮台县的英巴扎,全长 495 km(图 1)。该区(40°28′N,80°56′E 至 41°10′N,84°36′E)属典型暖温带大陆性干旱气候,区内光热资源丰富,年均日照时数 2 729.0 h,太阳总辐射能 5 796 MJ m^{-2} a^{-1};年均气温 10.4 ℃,平均气温≥10℃的持续日数为 201 d,≥10℃年积温 4 340 ℃;极端最高温度 39.4℃,极端最低温度-25.0℃。年均降水量 50.4 mm,年均蒸发量>2 500 mm,干燥度 12—19[10]。该区春、夏季多大风天气,风沙灾害频繁,是该区常见自然灾害。经实地考察,该区植物群落结构简单、乔灌草三层结构明显,物种多样性低,植被稀疏。优势种为胡杨(*Populus euphratica*)、灰胡杨(*Populus pruinosa*),林下主要分布多枝柽柳(*Tamarix ramosissima*)、铃铛刺(*Halimodendron halodendron*)、黑果枸杞(*Lycium ruthenwum*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、芦苇(*Phragmites australis*)、甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)等植物[10]。土壤类型为林灌草甸土。

2 材料与方法

2.1 植物群落调查与地下水位测定

经野外实地踏查于塔里木河上游(肖夹克—英巴扎)荒漠河岸林内选择林分具有代表性、人为干扰较小的上段南口镇(U_1)、中段沙雅(M_1)与下段轮南镇(L_1)设置研究断面(图 1),分别垂直河岸设置 3 条样带(50 m 宽),样带间隔 100 m,依据植被长势与地下水位在每条样带上每隔 100—500 m 设置 50 m × 50 m 样地 1 块(表 1),每块样地以 25 m 为间隔分成 4 个 25 m×25 m 的小样方,采用相邻格子法以 5 m × 5 m 为基本单元进行每木检尺,记录胸径(DBH)≥2.0 cm 的全部乔木及灌木种名、胸径(灌木为地径)、树高、冠幅[10]、树冠疏失度[11]、活立木和枯立木等指标;乔木幼苗统计时以基株为单位,记录其中径级最大一株的高度、地径、冠幅。草本层采用对角线以 1 m × 1 m 小样方对植物种类、高度、盖度、多度等进行详细调查。同时,各样方采用 GPS 定位,记录其经度、纬度、海拔高度、郁闭度等生态因子。每块样地采用对角线法(5 点)采集土样,深度定为 1.0 m,分 5 层用土钻每隔 20 cm 取土样,用铝盒和塑料袋封装,土壤含水量采用烘干法测定,地下水位采用人工打井(PVC 管,10 m)、电导法测定[12],用于长期监测样地地下水位。

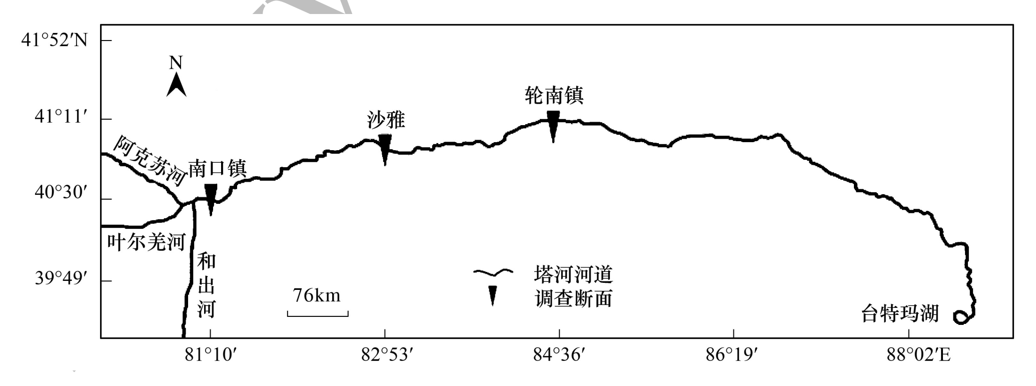


图 1 塔里木河上游荒漠河岸林群落调查断面示意图

Fig.1 Investigation sections of desert riparian forest at the upper reaches of Tarim river

2.2 数据分析

2.2.1 种群结构:

应用生态学中大小结构分析法[13]来研究种群年龄结构特征。虽然种群龄级和径级有所不同,但在同一环境下,同一树种的龄级和径级对环境的反应规律具有一致性[14]。按照 2003 年森林资源规划设计调查主要技术规定并结合胡杨生活史与生境异质性的特点,将种群划分为 12 个径级,第 1 径级胸径为 0—2 cm,第 2 径

级胸径为 2—4 cm,之后每级间隔 4 cm,把直径大于 40 cm 都归为第 12 级;第 1 径级对应 I 龄级,第 2 径级对应第 II 龄级,依此类推。统计各龄级株数及其占总体的百分比,以龄级为纵轴,各龄级所占%为横轴,绘制胡杨种群年龄结构图。乔木冠幅以树冠($d_{东西}+d_{南北}$)/2 来表示,树冠疏失度调查方法与评判标准[11]。

表 1　塔里木河上游不同生境胡杨群落生态特征与地下水位描述

Table 1　The statistical description of *P.euphratica* community at different habitats in the upper reaches of Tarim river

序号 No.		地下水位/m Groundwater level	参数 Paramaters					
			密度/(株/hm²) Density	平均胸径/cm Average diameter at breast height	冠幅/m Canopy diameter	盖度/% Coverage	树冠疏失度/% Crown loss	物种丰富度 Species richness
上段	1	2.3	340	14.72	4.59	37.79	<10	7
Upper section	2	2.6	280	17.82	3.39	32.88	<10	3
	3	3.0	144	22.31	4.64	30.27	10—15	3
	4	4.0	104	18.31	3.60	15.05	15—25	2
中段	5	1.2	29352	1.00	0.48	66.17	<10	9
Middle section	6	1.5	27884	1.23	0.54	46.28	<10	6
	7	2.0	4816	3.78	1.72	55.29	<10	4
	8	2.4	752	8.37	2.13	50.23	<10	4
	9	3.5	1096	17.93	3.16	38.31	10—15	3
	10	4.8	205	21.97	4.33	31.02	50	2
下段	11	1.4	8800	3.12	0.68	81.43	<10	23
Low section	12	2.2	2207	6.28	2.28	67.81	<10	18
	13	3.1	1290	13.56	2.55	50.12	10—15	10
	14	4.2	413	21.32	4.11	29.77	25—50	4
	15	5.5	297	17.78	2.44	22.75	75—100	2

2.2.2　Hill 与 β 多样性沿地下水位梯度的变化

含参数的多样性指数有利于揭示环境的变化或时空尺度的变化对多样性的影响,也有利于多样性大小的生态解释[2]。鉴于此,引入含参数的 Hill 多样性指数[2,15]:

$$N_a = \left(\left(\sum_{i=1}^{s} P_i^a\right)\right)^{1/1-a}$$

式中,$\alpha \geqslant 0$,$\alpha \neq 1$,规定 $\alpha = 1$ 时,$N_\alpha = e^H$,H 为 Shannon-Weiner 指数;$\alpha = 0$ 时,$N_a = S$;$\alpha = 2$ 时,$N_a = 1/D$,D 为 Simpson 多样性指数。P_i 表示第 i 个种的多度比例;S 表示样方内的物种数。

β 多样性可直观地反映不同生境物种组成的差异性,揭示不同环境梯度下生境被物种分割的程度或不同地段的生境多样性及物种替代速率与变化速率。本文选用 Sorensen 指数、Cody 指数和 Whittaker 指数作为 β 多样性的测度方法[16-17]:

Sorensen 指数　　$\beta_s = 2c/(a+b)$

Whittaker 指数　　$\beta_w = S/m_a - 1$

Cody 指数　　$\beta_c = [g(H)+t(H)]/2$

式中,S 为物种总数;m_a 为平均物种数;c 为两群落共有的物种数,a、b 为两群落的物种数;$g(H)$ 为沿环境梯度增加的物种数;$t(H)$ 为沿环境梯度失去的物种数,即在上一个梯度中存在的而在下一个梯度中没有的物种数目。

2.2.3　统计分析方法

离差平方和法是分类效果较好,在生态科学领域应用较广泛的聚类方法。依据塔里木河上游 3 个断面 45 块样地胡杨群落物种组成、种群数量指标(胸径、冠幅、密度等)、地下水位等调查资料,采用离差平方和法

进行聚类分析。同时,利用不同生境胡杨种群数量指标与地下水位进行回归分析,并对拟合曲线进行一阶求导得出种群适宜生存水位及地下水位阈值。应用 SPSS 19.0 统计软件进行数据分析和 Origin 8.0 作图。

3 结果与分析

3.1 荒漠河岸林胡杨群落生态特征对地下水位梯度的响应

3.1.1 胡杨群落特征对地下水位梯度的响应

优势种群作为环境梯度的一个相当可靠的指示者,其动态变化是生态环境变化的可见标志[18]。聚类分析显示(图 2),调查样地 5、6、11、12 归为一类(H_1),地下水位<2 m,主要分布在近河道、经常洪水漫溢区域(<200 m),群落物种组成多样,优势种为胡杨与铃铛刺,伴生种以浅根系中生草本植物为主;优势种与伴生种种子随洪水飘落河漫滩在充足土壤水分下萌发、生长形成物种多样性高与密度大的幼龄林。样地 1、2、3、7、8、9、13 归为一类(H_2),地下水位 2—4 m。随远离河道和地下水位下降、土壤水分降低,一些浅根系和中生性草本植物逐渐消失,群落主要以胡杨、柽柳、黑果枸杞、甘草、芦苇、骆驼刺等组成,群落乔、灌、草分层明显,种群密度降低,个体长势良好,植被主要依靠浅层地下水维系生存。但因地表丧失洪水漫溢补给,优势种胡杨种子难以萌发而缺乏更新及难以满足胡杨幼苗的生长,形成青壮林与成熟林并存格局。样地 4、10、14、15 归为一类(H_3),地下水位 4—6 m。由于距离河道较远,一些中生耐旱性差的灌草植物及多年生深根性的草本植物逐渐适应不了日益旱化环境而退出群落及小径级优势种难以吸收地下水而立枯,保留深根耐旱的胡杨、柽柳,形成群落结构简单、物种多样性低的过熟林。分类后的胡杨群落与优势种群特征见表 2。

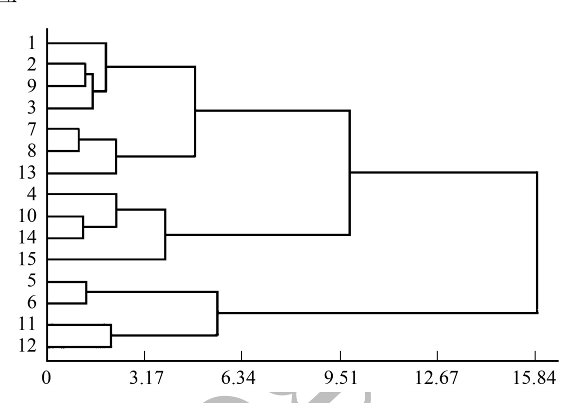


图 2 不同生境胡杨群落的聚类分析结果(Ward 法)

Fig. 2 The results of *P. euphratica* community under different habitats with Wards methods of cluster analysis

表 2 不同地下水位胡杨群落特征(聚类后)

Table 2 The characteristics of *P.euphratica* community on different groundwater levels after ward cluster analysis

地下水位/m Groundwater level		参数 Parameters							
		密度 Density/(株/hm^2)	平均胸径 Average diameter at breast height/cm	冠幅 Canopy diameter/m	盖度 Coverage/%	树冠疏失度/% Crown loss	物种丰富度 Species richness	死亡率 Mortality rate/%	林分郁闭度 Stand canopy density
H_1	<2	17061.75±13628.06	2.90±2.45	0.99±0.86	65.42±14.48	<10	14.00±7.87	0.03±0.06	0.79±0.07
H_2	2—4	1245.43±1632.06	14.07±6.27	3.17±114	42.48±9.17	10—25	4.86±2.67	1.43±1.52	0.42±0.12
H_3	4—6	254.75±131.69	19.85±2.11	3.62±0.84	24.65±7.36	44—69	2.50±1.0	24.01±19.41	0.23±0.07

H_1、H_2、H_3表示地下水位分别为 0—2 m、2—4 m、4—6 m 的生境

3.1.2 胡杨种群结构对地下水位梯度的响应

种群径级结构是揭示种群结构现状和更新策略的重要途径之一,是探索种群动态的有效方法。U_1、M_1、L_1断面胡杨种群径级结构沿地下水位梯度表现出相似的变化规律,随远离河岸与地下水位降低,种群均由增长型转变为稳定型,然后退化为衰退型种群(图 3)。表 2 可见,地下水位<2 m 生境(H_1),胡杨种群平均密度为 17061 株/hm^2,幼苗丰富;平均盖度为 65.4%,个体平均胸径<4 cm,处于幼龄阶段。随地下水位下降与远离河岸,地下水位在 2—4 m 生境(H_2)胡杨种群幼苗(DBH<2 cm)显著降低,降幅达 78.98%(与 H_1 相比);胸径明显增大,最大胸径达 60 cm,>4 cm 个体数增多 46.47%。种群结构呈金字塔型,但Ⅰ级幼苗比例仅为 21.02%,而Ⅱ级个体比例占 32.33%,表明种群属暂时稳定型。随未来水资源持续减少与地下水位持续降低,

胡杨种群因更新资源不足而趋于衰退。随离河岸距离不断增大,地下水位在 4—6 m 生境(H_3)胡杨种群幼龄比例(DBH<4 cm)降低至 5.38%,减少 48.15%(与 H_2 相比),同时这些幼龄个体均是根萌蘖产生,生长势极差。胡杨种群密度、冠幅、盖度与林分郁闭度降低,但平均胸径、树冠疏失度与立枯死亡率增大,尤其树冠 2/3 以上干枯(疏失度达 70%)和立枯比率最高达 50.3%。种群最大胸径达 82 cm,>32 cm 个体数增多 15.67%,种群结构呈倒金字塔型,Ⅰ、Ⅱ级幼苗严重匮乏(图 3),属衰退型种群。可见,随地下水位的下降,种群结构由更新资源丰富、增长型逐渐转变为更新匮乏、立枯增多的衰退型种群,林分由幼龄林演化为成过熟林。地下水位降低是导致优势种群衰退的直接因子。

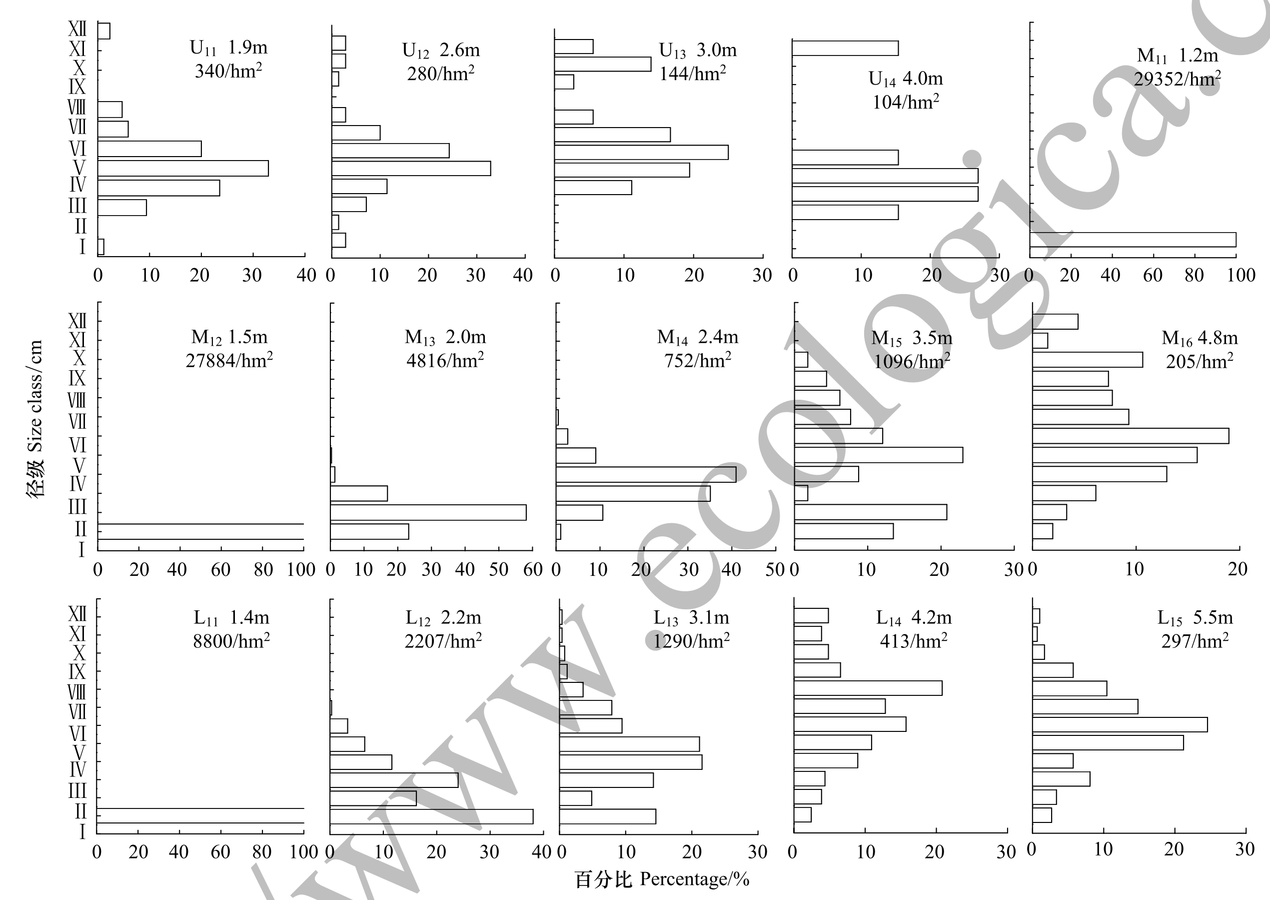


图 3 塔里木河上游 3 个断面胡杨种群径级结构沿地下水位梯度的动态

Fig.3 The DBH distribution of *P.euphratica* under different habitats in the upper reaches of Tarim river

U_{11}—U_{14}为上段南口镇;M_{11}—M_{16}为中断沙雅;L_{11}—L_{15}为下段轮南镇

3.1.3 胡杨种群数量特征对地下水位梯度的响应

地下水是干旱荒漠区植被赖以生存的重要水分来源,尤其地下水是胡杨生存与生长的先决条件[19]。图 4 可见,胡杨种群密度、盖度与林分郁闭度均随地下水位下降而降低,死亡率则增加;密度、盖度、死亡率、林分郁闭度与地下水位的拟合曲线均达极显著水平(P<0.01)(图 4);平均胸径、冠幅与地下水位呈二次曲线关系(P<0.01)(图 4),表明地下水位直接影响优势种群结构、密度、长势与存亡动态。冠幅间接反映树冠的饱满程度和树木长势状况的好坏[11],冠幅变化是衡量环境梯度下种群生长状态的重要生态指标之一。对胡杨种群冠幅与地下水位的二次曲线进行一阶求导(图 4),当地下水位为 3.95m 时,胡杨个体冠幅最大,随地下水位降低而下降。表明地下水位<4 m,胡杨种群树冠伸展与生长势强,光合面积大,此为胡杨种群的适宜生存水位,这与徐海量等[20]、樊自立等[21]研究结果相似。对胡杨种群密度、死亡率、林分郁闭度与地下水位的数量关系分析,当地下水位分别为 8.0、7.05 m 和 7.42 m 时,种群密度与林分郁闭度为 0 及死亡率达 100%,表明地

下水位在 7—8 m，是胡杨种群生存的地下水位阈值。

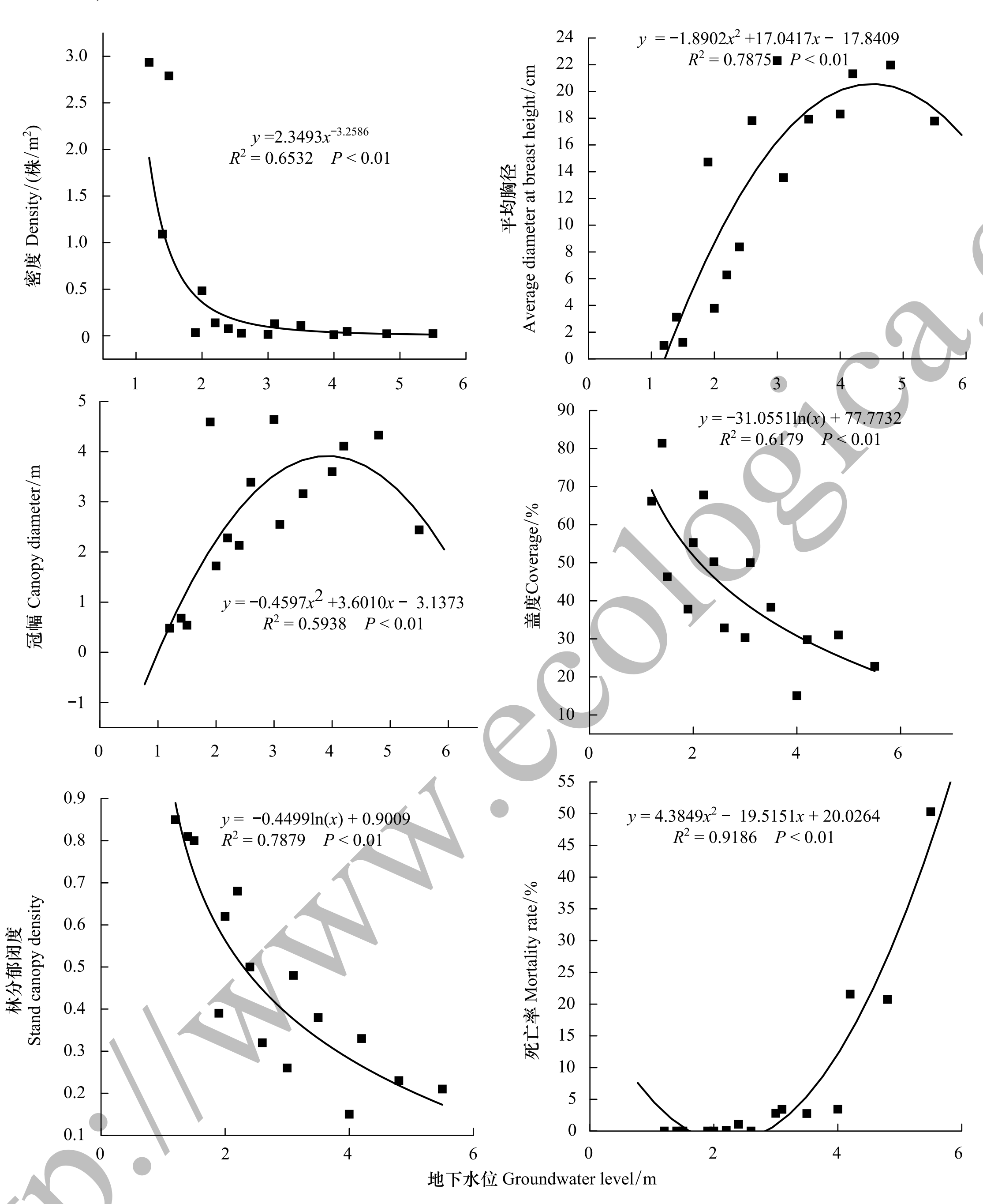


图 4 塔里木河上游胡杨种群数量特征与地下水位的关系

Fig.4 The relationship of quantitative characteristics of *P. euphratica* population and groundwater levels in the upper reaches of Tarim river

3.2 胡杨群落 Hill、β 多样性对地下水位梯度的响应

3.2.1 胡杨群落 Hill 多样性对地下水位梯度的响应

图 5 可见，胡杨群落物种多样性随着地下水位下降表现出逐步降低趋势，地下水位越深，多样性指数越小。这是因随着地下水位下降，乔木多样性无变化，而灌木和草本的生存资源不断减少，物种丰富度和均匀度逐步降低所致。同时，图 5 显示出塔里木河上游物种多样性随地下水位梯度呈现出 3 个明显不同的变化特征。①地下水位<2 m，3 个断面不同地下水位生境的物种多样性指数走势相似，均呈迅速降低趋势，并随参数 α 增大多样性指数变幅明显，$\alpha = 0.8$、2.0 时多样性指数比 $\alpha = 0$ 时分别降低了 9.5 倍、68.1 倍。②地下水位

2—4 m 范围内,不同地下水位生境的多样性指数下降减速、曲线弯曲度与高差缩小;并随着参数 α 增大多样性指数变幅缩小,α=0.8、2.0 时多样性指数比 α=0 时分别降低了 3.7 倍、11.6 倍。③地下水位 4—6 m 范围内,不同地下水位生境的多样性曲线走势趋于平直化,几乎成一条直线;并随着参数 α 增大多样性指数变化较小,α=0.8、2.0 时多样性指数比 α=0 时分别降低了 2.4 倍、4.6 倍。3 个断面胡杨群落 Hill 多样性指数随地下水位梯度的变化趋势与聚类分析后 Hill 指数变化趋势基本一致(图 5)。可见,地下水位在 4—6 m 范围内,塔里木河上游物种多样性明显锐减。此阶段由于地下水位较深且长年缺乏洪水的补给而逐年降低,地下水位超过了草本植物的耐受限度造成草本植物死亡;继而致使耐旱性差的半灌木和灌木逐渐衰退并消失,使胡杨群落物种种类和数量骤减、多样性降低。可以预见地下水位>6 m,塔里木河上游植物群落退化为稀疏衰败的胡杨+柽柳或单优柽柳群落,这与野外调查结果一致。

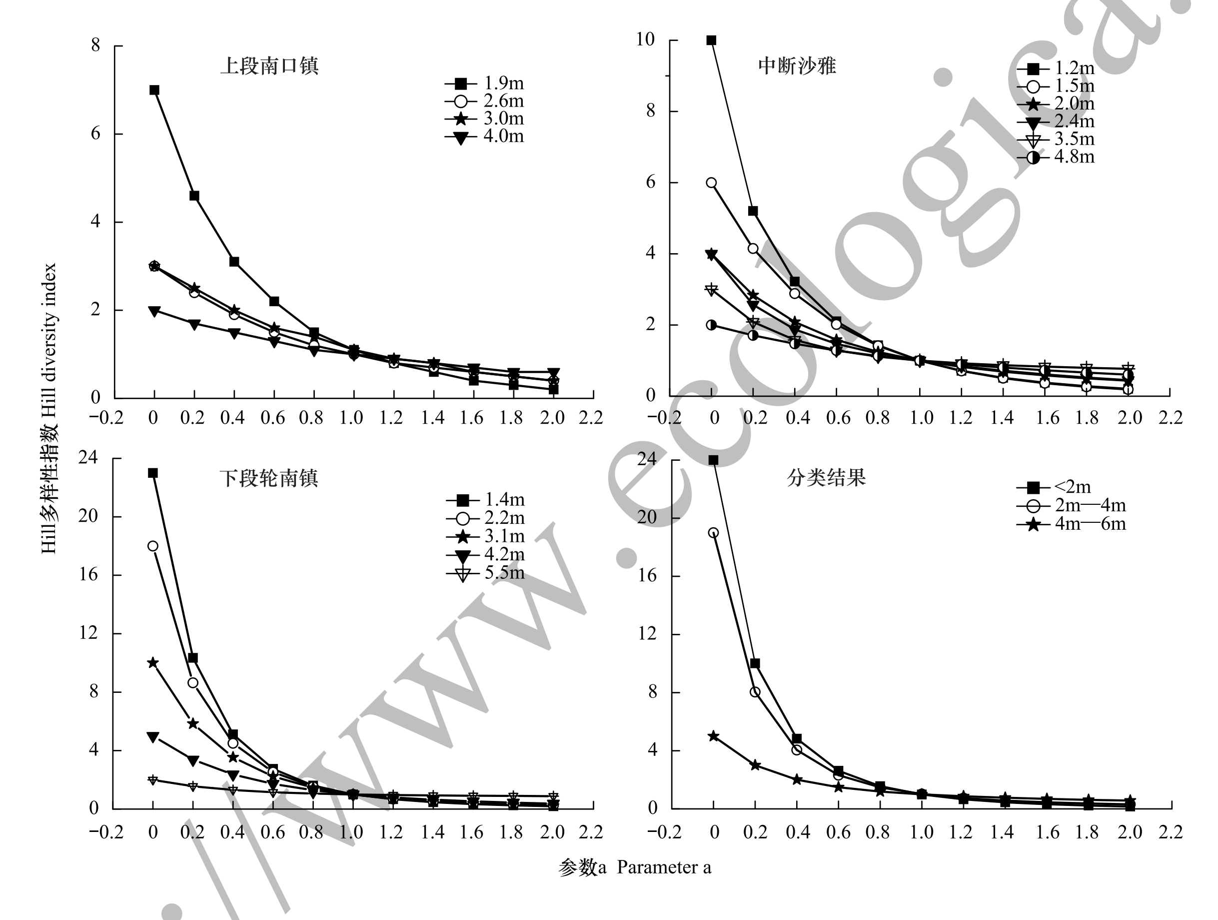


图 5　塔里木河上游 Hill 多样性对地下水位梯度的响应

Fig.5　The response of *Hill* species diversity to groundwater level in the upper reaches of Tarim river

3.2.2　胡杨群落 β 多样性对地下水位梯度的响应

图 6 可见,胡杨群落 Cody(β_c)和 Whittaker(β_w)指数随相邻样地间生境异质性增大而增大,Sorensen(β_s)指数则随之降低(图 6)。聚类后的相邻样地间 β_s 值均大于非相邻样地间 β_s 值,β_s 最大值出现在样地 H_1 与 H_2(SH_{1-2})之间(图 6),说明地下水位<4 m 胡杨群落结构与物种组成相似,共有种较多;随地下水位降低,β_s 值随之下降,样地 H_2 与 H_3(SH_{2-3})、H_1 与 H_3(SH_{1-3})间的 β_s 值分别比 SH_{1-2} 降低了 30.31%、43.38%,表明地下水位>4 m,H_3 样地物种多样性与共有种明显降低,群落层次结构简单化,胡杨种群特征变化较大(表 1);此水位正是中生浅根系灌、草植物迅速退出群落的临界区域,也是由中生植物向中旱生-旱生植物演化的区域。聚类后的 β_c、β_w 均随着地下水位梯度递增呈逐渐增大趋势,且非相邻样地间 β_c、β_w 值大于相邻样地间,β_c、β_w 最大值均出现在样地 H_1 与 H_3(SH_{1-3}),SH_{2-3} 与 SH_{1-3} 的 β_c、β_w 值分别比 SH_{1-2} 增大了 20%、80% 和 103.04%、147.47%(图 6),不同生境间物种变化速率较快,生境异质性显著增强。β_s、β_c、β_w 与地下水位高差之间均呈极显著相关

(P<0.01)(图 6S、T、W),表明随地下水位降低,胡杨群落层次结构与种类组成差异性增大,共有种和物种多样性显著减少,物种旱生化,植株稀疏,群落逆行演替至以生态幅宽、抗旱性强的深根性乔灌物种(胡杨/柽柳),这与刘加珍等[22]研究结果相似。

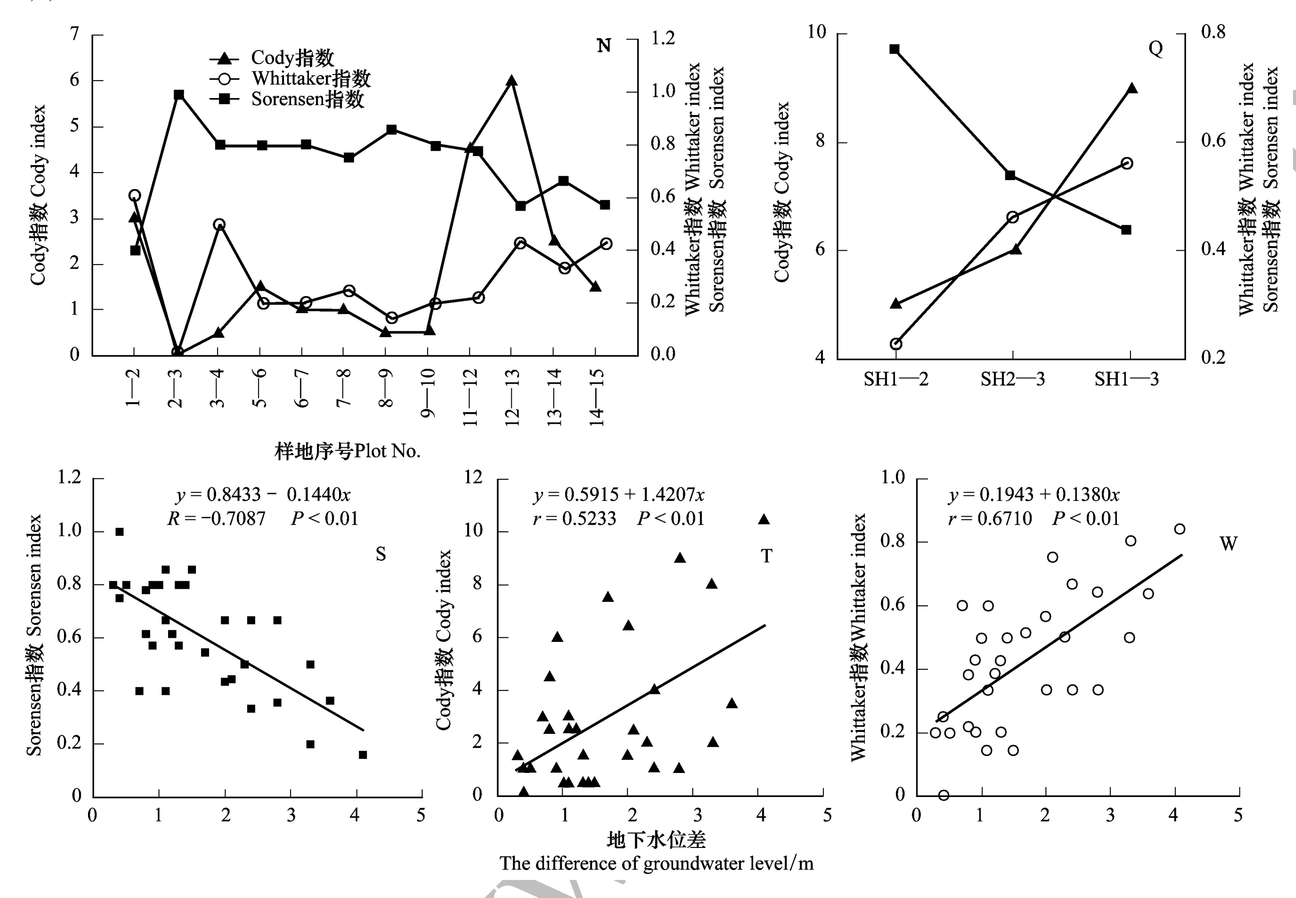


图 6 胡杨群落 β 多样性指数沿地下水位梯度的变化

Fig.6 The dynamics of β diversity index of *P.euphratica* along the groundwater level gradients

SH_{1-2}表示样地 H_1 与样地 H_2 间的指数计算, 其它类推

4 讨论

塔里木河流域两岸分布着经长期自然演替形成以胡杨为优势种的荒漠河岸林,其依水而生,无水而亡是植被发生发展的典型特征。受全球气候变暖、径流量逐年减少和人类社会经济活动对流域水资源时空分布的改变,使植物群落发展长期停留在演替早期阶段,由于乔灌草物种之间的依存性较弱,胡杨种群在群落中的优势地位未发生动摇。随地下水位持续降低,胡杨群落结构简化、物种多样性降低、优势种群稀疏与长势衰败,反映出极端干旱区地下水位是限制荒漠植被分布与生存的关键生态因子。学者研究指出地下水位持续降低和立地条件干化是引起塔里木河流域优势种群衰败与植被退化的主导因子[1-5,20-23]。然而,干旱区植被演变与地下水位变化之间存在着复杂的关系,植物群落、物种多样性变化与地下水位的定量关系及合理地下水位的确定均涉及到地下水、土壤、植被等相互之间的动态平衡[1-2,4,23]。因此,学者分别从荒漠植被数量特征、植物生理生态、地下水水质对地下水位的响应;物种生态位与分布频率、潜水蒸发与土壤盐渍化及荒漠化的关系等方面[2-4,6,9,20-26]来探索研究干旱荒漠区植被合理生态水位。陈亚宁等指出胡杨、柽柳生存的合理生态水位应<4 m,临界地下水位为 9 m 左右[3]。郝兴明等[2,4,23]、庄丽等[24]、张丽等[25]、袁素芬等[26]指出塔里木河下游地下水埋深>6 m 植被盖度小于 20%,柽柳生物量最大值在地下水埋深 4.52 m 以内,>7 m 其生物量较小;植物生长和维持较高物种多样性的适宜地下水位在 2—4 m,植被正常生长开始受到胁迫和物种多样性受损

的临界地下水位为 6 m。陈永金等[9]指出塔里木河下游能维持较好水质并抑制荒漠化发展的合理生态水位为 5 m。樊自立等[21]研究指出地下水埋深大于 2 m 时，土壤积盐微弱；埋深 4—6m 时植被生长受抑，确定荒漠植被生存适宜生态水位在 2—4 m。徐海量等[20]把既能减少地下水强烈蒸发返盐，又不造成土壤干旱而影响植物生长的合理生态水位作为评价标准，确定塔里木河下游合理生态水位为 3.5—5 m。Lamontagne 等[27]指出澳大利亚 Daly 河流域的河岸林植被适宜生态水位<5 m。综上所述，塔里木荒漠河岸林植被合理生态地下水位应保持在 2—4 m，利于植被生长和生态环境恢复[25]。这一结果与流域生态输水工程实施后发现地下水埋深 2—5 m 时植被恢复状况良好[9,20]基本一致。本文从植物群落物种多样性、优势种群数量特征与地下水位的定量分析，表明塔里木河上游不同地下水位的胡杨群落大致可划分为 3 类，随地下水位降低，胡杨群落结构简化、物种多样性下降，当地下水位在 4—6 m 时，物种多样性锐减，β 多样性急剧增大，物种变化速率加快，生境异质性显著增大；地下水位在 2—4 m 时，群落相似性与共有种较高。可见，4 m 是物种多样性开始受损与群落结构简化的地下水位。同时优势种胡杨种群密度、冠幅、盖度与生长势下降，死亡率增大，种群结构由增长型演化为衰退型，林分由幼龄林逐渐转变为成过熟林。当地下水位 4—4.5m 时，优势种胡杨种群冠幅、平均胸径最大；此时群落盖度>30%，林分郁闭度>0.25，远大于 20%的荒漠化临界盖度。而当地下水位在 6—6.5m，群落盖度<20%与林分郁闭度<0.1，此时林相衰败、群落退化与荒漠化突显，这与徐海量等[20]报道塔里木河下游地下水位在 5.83—7.46 m 时，植被大片衰败与盖度<15%相似。进一步分析胡杨数量特征与地下水位的关系，发现胡杨种群生存的地下水位阈值为 7—8 m。徐海量等[20]曾报道塔里木河下游地下水位在 7.35—8.57 m 时，植被大片枯死与活植被盖度仅为 2%；且这一水位仅能满足尚存的个别深根系植被救命之用，无法实现自然植被的生态恢复。因此，塔里木河上游胡杨群落维持较高物种多样性和优势种正常生长的合理生态水位在 4 m 左右，地下水位>6 m 胡杨群落衰败、物种多样性锐减，优势种长势衰弱，此地下水位可视为维持荒漠河岸林稳定的临界水位。从区域植被恢复与生态环境改善角度出发，塔里木荒漠河岸林植被恢复的合理生态地下水位在 4 m 左右，保持荒漠河岸林稳定的地下水位应<6 m，这与学者研究结果[2,3,4,6,20-21,23-26]基本一致。

5　结论

（1）塔里木河上游不同地下水位的胡杨群落划归为地下水位<2 m，2—4 m 和 4—6 m 的 3 类群落。随地下水位梯度降低，荒漠河岸林群落层次结构简单化与物种组成差异性增大，物种多样性降低，优势种胡杨密度、冠幅、盖度与长势下降，死亡率增大，种群结构由增长型演化为衰退型，林分由幼龄林逐渐转变为成过熟林。地下水位降低是导致优势种群衰退和群落衰败的主导因子。

（2）塔里木河上游荒漠河岸林物种多样性开始受损的地下水位为 4.0 m；地下水位 6 m 左右，植物群落明显退化，优势种群稀疏衰败。胡杨种群适宜生存地下水位<4 m，地下水位阈值在 7—8 m。

（3）塔里木荒漠河岸林植被恢复的合理生态地下水位在 4 m 左右。

参考文献（References）：

[1] 陈亚宁，李卫红，徐海量，刘加珍，张宏峰，陈亚鹏. 塔里木河下游地下水位对植被的影响. 地理学报，2003，58(4)：542-549.

[2] 郝兴明，李卫红，陈亚宁. 新疆塔里木河下游荒漠河岸(林)植被合理生态水位. 植物生态学报，2008，32(4)：838-847.

[3] 陈亚宁，王强，李卫红，阮晓，陈亚鹏，张丽华. 植被生理生态学数据表征的合理地下水位研究——以塔里木河下游生态恢复过程为例. 科学通报，2006，51(S1)：7-13.

[4] 郝兴明，陈亚宁，李卫红. 新疆塔里木河下游物种多样性与地下水位的关系. 生态学报，2007，27(10)：4106-4112.

[5] 宋郁东，樊自立，雷志栋，张发旺. 中国塔里木河水资源与生态问题研究. 乌鲁木齐：新疆人民出版社，2000.

[6] 陈亚宁，陈亚鹏，李卫红，张宏锋. 塔里木河下游胡杨脯氨酸累积对地下水位变化的响应. 科学通报，2003，48(9)：958-961.

[7] 张惠昌. 干旱区地下水生态平衡埋深. 勘察科学技术，1992，(6)：9-13.

[8] 杨泽元，王文科. 干旱半干旱区地下水引起的生态效应的研究现状与发展趋势. 干旱区地理，2009，32(5)：739-745.

[9] 陈永金，陈亚宁，李卫红，刘加珍. 塔里木河下游输水条件下浅层地下水化学特征变化与合理生态水位探讨. 自然科学进展，2006，16

(9): 1130-1137.
[10] 韩路, 王家强, 王海珍, 宇振荣. 塔里木河上游胡杨种群结构与动态. 生态学报, 2014, 34(16): 4640-4651.
[11] 古丽加米拉木·买买提, 玉米提·哈力克, 塔依尔江·艾山, 王金山. 胡杨树冠疏失度对塔里木河下游应急生态输水的响应. 新疆农业科学, 2010, 47(2): 241-245.
[12] 马建新, 陈亚宁, 李卫红, 黄湘, 朱成刚, 马晓东. 胡杨液流对地下水埋深变化的响应. 植物生态学报, 2010, 34(8): 915-923.
[13] 李先琨, 苏宗明, 向悟生, 宁世江, 唐润琴, 欧祖兰, 李瑞棠. 濒危植物元宝山冷杉种群结构与分布格局. 生态学报, 2002, 22(12): 2246-2253.
[14] Frost I, Rydin H. Spatial pattern and size distribution of the animal-dispersed tree *Quercus robur* in two spruce-dominated forests. Ecoscience, 2000, 7(1):38-44.
[15] 张金屯. 数量生态学. 北京: 科学出版社, 2004.
[16] 马克平, 刘灿然, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法 II. β 多样性的测度方法. 生物多样性, 1995, 3(1): 38-43.
[17] 赵淑清, 方精云, 宗占江, 朱彪, 沈海花. 长白山北坡植物群落组成、结构及物种多样性的垂直分布. 生物多样性, 2004, 12(1): 164-173.
[18] Gregory S V, Swanson F J, McKee W A, Cummins K W. An ecosystem perspective of riparian zones. BioScience, 1991, 41(8): 540-551.
[19] Gries D, Zeng F, Foetzki A, Arndt S K, Bruelheide H, Thomas F M, Zhang X, Runge M. Growth and water relations of *Tamarix ramosissima* and *Populus euphratica* on Taklamakan desert dunes in relation to depth to a permanent water table. Plant, Cell & Environment, 2003, 26(5): 725-736.
[20] 徐海量, 宋郁东, 陈亚宁. 生态输水后塔里木河下游合理水位探讨. 水土保持通报, 2003, 23(5): 22-25.
[21] 樊自立, 马英杰, 张宏, 王让会, 赵元杰, 周宏飞. 塔里木河流域生态地下水位及其合理深度确定. 干旱区地理, 2004, 27(1): 8-13.
[22] 刘加珍, 陈亚宁, 李卫红, 陈亚鹏. 塔里木河下游植物群落分布与衰退演替趋势分析. 生态学报, 2004, 24(2): 379-383.
[23] 郝兴明, 陈亚宁, 李卫红, 赵锐锋, 朱成刚. 塔里木河中下游荒漠河岸林植被对地下水埋深变化的响应. 地理学报, 2008, 63(11): 1123-1130.
[24] 庄丽, 陈亚宁. 塔里木河下游干旱胁迫条件下柽柳生理代谢的响应. 科学通报, 2006, 51(4): 442-447.
[25] 张丽, 董增川, 黄晓玲. 干旱区典型植物生长与地下水位关系的模型研究. 中国沙漠, 2004, 24(1): 110-113.
[26] 袁素芬, 陈亚宁, 李卫红, 刘加珍, 孟丽红, 张丽华. 新疆塔里木河下游灌丛地上生物量及其空间分布. 生态学报, 2006, 26(6): 1818-1824.
[27] Lamontagne S, Cook P G, O'Grady A, Eamus D. Groundwater use by vegetation in a tropical savanna riparian zone (Daly River, Australia). Journal of Hydrology, 2005, 310(1/4): 280-293.